

А.М.НИКИТИН, НТУ «ХПИ»

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ. ЧАСТЬ 2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ЛДИС

В статті приведено результати оцінних розрахунків параметрів оптичних схем ЛДВПІ, адаптованих до вимірювання характеристик потоків частково прозорих рідин. Показано ефективність алгоритму на етапі компоновання оптичних схем ЛДВПІ.

In this article estimations of the optical parameters schemes LDA adapted to measuring of stream performances of restricted transparency fluids are reduced. Efficiency of algorithm at a phase of layout LDA optical schemes is shown.

Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС), разработанные в [1, 2] для конкретных задач измерений, ориентированы на получение характеристик движения среды и реализуют набор требований, соответствующих данным задачам. Особенности различных экспериментальных задач препятствуют созданию универсальных схем измерителей, удовлетворяющих массовым требованиям [1]. Учитывая ограничения и особенности доступа к потокам рабочих сред в каналах теплоэнергетического оборудования, в первом приближении, компоновка оптическая схема (ОС) должна удовлетворять специфическим требованиям [1]. Расстояние от поверхности выходной линзы до измерительного объема не менее $f_{\text{ИО}}$. Размер разделяющего оптического окна в стенке канала не более $d_{\text{К}}$. Диапазон измеряемых скоростей $[V_{\text{min}} \div V_{\text{max}}]$ определяется условиями эксплуатации изучаемого канала.

Сравнение и анализ реализованных вариантов ОС [1,2] позволяет выбрать интерференционные схемы ЛДИС, приведенные на рис. 1, с регистрацией рассеянного (ОС1) и отраженного (ОС2) сигнала как наиболее применимых в изложенных условиях измерений. Обе ОС имеют простую конструкцию и высокую оптическую эффективность. Лазерный пучок акустооптическим модулятором (АОМ) разделяется на несколько лучей с индивидуальными частотами модуляции и пространственными параметрами. Выбранные с помощью оптического коммутатора (ОК) лучи участвуют в формировании параметров измерительного объема. Количество и последовательность комбинаций модулированных лучей, формирующих ИО, задается подвижной частью ОК. Объектив L_1 направляет лучи в фокус, расположенный в области измерений, тем самым формирует измерительный объем (ИО) ЛДИС. Параметры измерительного объема, как сенсорного элемента зависят от характеристик излучателя, частот модуляции формирующих лучей, а также от апертуры и фокусного расстояния формирующего объектива. В ОС с регистрацией отраженного излучения свет, рассеянный против направления оптической оси схемы, собирается тем же объективом L_1 и затем с помощью зеркала направ-

ляется на фотоприемник. Объектив L_2 , вместе с диафрагмой M_2 служит для отображения состояния ИО на фотодетектор. Диафрагма M_2 , установленная перед детектором, ограничивает наблюдаемую область. В ОС с регистрацией рассеянного излучения свет, проходящий сквозь область течения, собирается объективом L_2 на диафрагму M_2 .

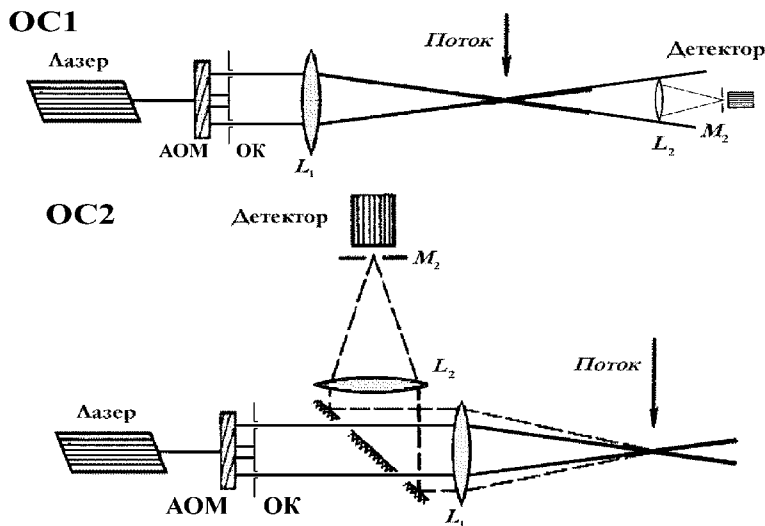


Рисунок 1 – Интерференционные оптические схемы ЛДИС

Если использовать алгоритм расчета параметров компонентов ОС, описанный в [4], с учетом соотношения мощности отраженного и рассеянного излучения в потоке как 13/82 [1], то оптические схемы с регистрацией рассеянного излучения обладают некоторым преимуществом по сравнению с системами, которые используют отраженный поток пучок. Ожидаемое для таких схем уменьшение мощности излучателя при сохранении полной работоспособности может быть до 6 раз, что во многих случаях становится существенным. Это соотношение для конкретных потоков изменяется в меньшую сторону, так как уменьшение мощности излучения ИО не линейно зависит от прозрачности потока, величины фокусного расстояния приемного объектива L_2 и концентрации рассеивающих частиц в потоке.

Использование модулирующих устройств, описанных в [5], в составе оптических схем ЛДИС позволяет создать оригинальное распределение электромагнитного поля излучателя в области чувствительного объема. Формирующая и приемная части ОС, сконфигурированные соответствующими методами [3], выполняют часть базовой задачи метода ЛДА и удовлетворяют условиям совместности измерений. Согласно [1] метод лазерной анемометрии сводится к реализации комплекса частных задач, направленных

ных на решение обратной задачи взаимодействия когерентного излучения с движущейся средой в малой области измерительного объема. Очевидно, компоновка ОС детерминирована набором условий, выполнение которых гарантирует получение сигналов, однозначно соответствующих состоянию ИО в исследуемом потоке.

Вид интерференционных структур, получаемых в области измерительного объема при использовании трех формирующих лучей, каждый из которых модулирован индивидуальной частотой, можно проиллюстрировать рисунками 2 и 3.

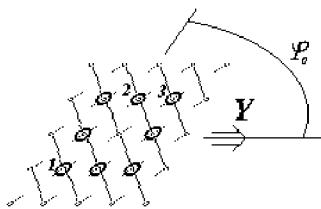


Рисунок 2 – Дифракционная картинка при не ортогональной модуляции

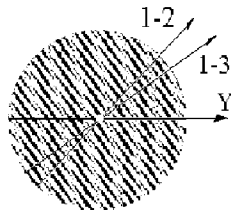


Рисунок 3 – Ориентация интерференционных максимумов в ИО.

В качестве лучей, формирующих интерференционную структуру, выбраны дифракционные максимумы 1, 2 и 3 (рис. 2). Направляющие векторы интерференционных волн соответствуют направлениям 1-2, 1-3 и 2-3. Направление 2-3 совпадает с направлением оси Y в системе координат ИО [5].

Схема на рис. 3 соответствует мгновенному состоянию интенсивности излучения в измерительном объеме. Учитывая частоты модуляции $\omega_1 = -2\omega_q$, $\omega_2 = \omega_q$ и $\omega_3 = 2\omega_q$, минимальная частота диапазона чувствительности ЛДИС определена как $\omega_{min} = \omega_q - V_{max} 4\pi \sin \theta / \lambda$, верхний предел диапазона – $\omega_{max} = 4\omega_q + V_{max} 4\pi \sin \theta / \lambda$. Очевидно, максимальная частота аналогового канала обработки сигнала ЛДИС должна превышать ω_{max} . Ширина единичного максимума на схеме составляет около 3 мкм. Максимальная скорость смещения интерференционной волны в направлении 1-3 достигает 60 м/с, скорость смещения вдоль оси Y примерно 16 м/с.

Приведенные параметры являются определяющими при оценке состояния ИО ЛДИС. Данный пример не может претендовать на полноту описания состояния измерительного объема во время измерений и показывает волновую структуру, полученную сложением трех бегущих интерференционных волн.

Для учета частичной прозрачности рабочих сред, в первом приближении, можно ввести в рассмотрение функцию оценки потерь мощности излучения при прохождении через область потока, согласно пути прохождения излучения на рис. 1,

$$\vartheta = 1 - \chi_f \left(\frac{f_{L1}}{\cos \theta} + f_{L2} \right), \text{ для ОС1 и} \quad (1)$$

$$\vartheta = 1 - \chi_f f_{L1} \left(1 + \cos \theta / \cos \theta \right), \text{ для ОС2,}$$

где f_{L1} и f_{L2} – фокусные расстояния объективов; θ – угол сведения лучей; χ_f – экспериментально определяемый коэффициент прозрачности потока.

Величина χ_f учитывает часть мощности излучения ИО, которая потеряна на вторичных переотражениях и поглощена рабочей средой в области течения, отнесенную к единице пути прохождения лучей в потоке. Оценка предельных значений χ_f в экспериментах с различными рабочими средами может проводиться в фазе подготовки эксперимента. Для потока дистиллированной воды, содержащей в качестве рассеивателей $2,5 \cdot 10^{-4}$ весовые части порошка АСТТ χ_f оставалась меньше 10^{-4} в течение трех месяцев. Для неочищенной водопроводной воды с той же концентрацией рассеивателей по истечению трех месяцев величина χ_f достигала 0,074, а в потоке дистиллированной воды с добавлением молока в качестве рассеивающей добавки условия регистрации сигналов ЛДИС нарушались в течение недели. Учет влияния прозрачности становится необходимым при проектировании экспериментальных установок, использующих среды естественного происхождения либо среды с органическими рассеивателями.

Определение мощности источника излучения, измерителя проектируемого для экспериментов в частично прозрачных рабочих средах возможно по алгоритму, приведенному в [4]. Формирование ИО более, чем двумя модулированными лучами приводит к пропорциональному увеличению интенсивности излучения в интерференционных максимумах

$$P_l = \frac{\vartheta \cdot N_m P_f}{N_f (1 - \delta P)^s} \quad (2)$$

где N_m – число эквивалентных максимумов на выходе модулятора [3], работающего в режиме дифракции Рамана-Ната; P_f – мощность излучения, сфокусированная в ИО; N_f – количество формирующих ИО лучей; s – число границ оптических поверхностей элементов ОС; δP – средние потери на разделах фаз.

В составе ОС ЛДИС традиционно используются лазеры малой и средней мощности видимого диапазона спектра. Наиболее распространены He-Ne генераторы с длиной волны $\lambda = 6,328$ мкм. В схемах с регистрацией рассеянного излучения (ОС1, рис. 1) по конструктивным соображениям объектив L_2 обычно имеет большее фокусное расстояние, чем L_1 , и расстояние от оптической поверхности L_2 до ИО также больше чем расстояние до L_1 . Поэтому влияние загрязнения движущейся среды на качество принимаемых сигналов существенно, и контроль прозрачности потока становится важным при длительных измерениях.

Для ОС2, приведенной на рис. 1, с учетом четырех границ разделительного окна, ограничивающего область течения число поверхностей, встречаемых лучом в оптическом канале ЛДИС $s = 15$ [4]. В оценочном расчете можно принять это же число и для ОС1, это удобно при сравнении двух типов схем.

Результаты расчетов компонентов оптических схем ЛДИС (рис. 1) для измерения скорости потоков частично прозрачных жидкостей в каналах с ограниченным доступом с диапазоном измерений от -1 до 1 м/с приведены в таблице.

Параметры компонентов ОС ЛДИС

Параметр	Ед. изм.	ОС1 ФЭУ 49	ОС1 ФТ2	ОС2 ФЭУ 49	ОС2 ФТ2
Лазер					
Длина волны излучения	м	$6,328 \cdot 10^{-7}$	$6,328 \cdot 10^{-7}$	$6,328 \cdot 10^{-7}$	$6,328 \cdot 10^{-7}$
Мощность (не менее)	Вт	$12 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-3}$	$93 \cdot 10^{-3}$	1,28
Модулятор					
Базовая частота модуляции	Гц	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
Число активных максимумов	шт.	16	16	16	16
Объектив L_1					
Фокусное расстояние	м	$0,25 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,3$	$0,25 \pm 0,3$
Апертура	м	$0,04 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,05$
Относительное отверстие		2	2	2	2
Объектив L_2					
Фокусное расстояние	м	0,35	0,35	0,028	0,028
Апертура	м	$0,02 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,05$
Относительное отверстие		4	4	2,4	2,4
Система обработки					
Частотный диапазон	Гц	$1,2 \cdot 12 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 12 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 12 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 12 \cdot 10^6$
Временное разрешение	с	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$

Данные, приведенные в таблице, рассчитаны при $\chi_L = 0,1$, что примерно соответствует прозрачности рабочей среды, содержащей в качестве рассеивателей молоко, по истечению 3-4 суток. Мощность лазера является базовой величиной, применение просветленных объективов L_1 и L_2 и тщательно выполненная процедура юстировки уменьшает расчетное значение в 1,5 раза. Предлагаемый расчет может использоваться на стадии проектирования ОС ЛДИС или при контроле и подборе компонентов в процессе наладки.

Оптические схемы экспериментальных установок, опубликованных в [5,6], компоновались с учетом изложенных алгоритмов. Как показывает практика использования приведенных оценочных расчетов, их результаты являются базовыми для процесса сборки ОС. При наладке ЛДИС оптимизировались параметры, зависящие от состояния всех систем измерителя, такие как пространственное и частотное разрешение, соотношение сигнал-шум и другие. Приведенные расчеты можно рассматривать как страховку от наиболее неприятной и трудоемкой процедуры замены компонентов ОС, повторной юс-

тировки и переналадке всего комплекса измерителя.

Результаты оценочного расчета показывают, что ЛДИС с оптическими схемами ОС1-ФТ2 и ОС2-ФЭУ49 возможно реализовать с применением ОКГ ЛГ-38 с паспортной мощностью излучения 80 мВт. Схема ОС1-ФЭУ49 может быть реализована с источником типа ЛГ-55 с паспортной мощностью излучения 15 мВт. Эффективность изложенного подхода подтверждается многократным его применением. В [6] приведена конфигурация оптической схемы практически совпадающей с примером расчета ОС1-ФЭУ49. Оптическая схема экспериментального ЛДИС опубликованная в [5] соответствует расчету ОС2-ФЭУ49.

Список литературы: 1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука. 1982. – 304 с. 2. Дюррани Т., Грейтюд К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 336 с. 3. Мустель Э.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. – М.: Наука, 1970. – 295 с. 4. Никитин А.М. Расчет мощности лазера и параметров оптических схем // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Радиофизика и ионосфера». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 23. – С. 73-79. 5. Товажнянский Л.Л., Никитин А. М. и др. Лазерная диагностика потоков. Часть 1. Двумерные модуляторы лазерного излучения // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Динамика и прочность машин». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 12, т.1. – С. 139-146. 6. Товажнянский Л.Л., Никитин А.М. и др. Исследование гидродинамики турбулентных потоков в моделях пластинчатых теплообменников // Тезисы докладов всесоюзной научной конференции «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств» 11-13 июня 1985 г. – Харьков, 1985. – С. 46-47.

Поступила в редколлегию 20.04.2005

УДК 614.84:664

В.П.ОЛЬШАНСКИЙ, докт.физ.-мат.наук; **И.В.МИЩЕНКО**,
канд.техн.наук, Академия гражданской защиты, Харьков;
С.В.ОЛЬШАНСКИЙ, НТУ «ХПИ»

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА БАЛЛИСТИКИ СВОБОДНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СТРУИ

Визначено умови витікання стаціонарного струменя, за яких його траєкторія проходить через задану точку вертикальної площини під прямим кутом до неї, а частинки рідини в цій точці мають задану швидкість руху.

The conditions of the expiration of a stationary jet are determined, at which its trajectory passed through the given point of a vertical plane under a direct angle to it, and the particles of a liquid in this point have the given speed of movement.

Состояние и актуальность проблемы. В технических расчетах балли-